

## 三相かご形誘導電動機における機内高調波の解析に関する研究

著者	三上 浩幸
号	52
学位授与番号	3939
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/37655">http://hdl.handle.net/10097/37655</a>

氏名	み かみ ひろ ゆき 三 上 浩 幸
授与学位	博士（工学）
学位授与年月日	平成20年3月25日
学位授与の根拠法規	学位規則第4条第1項
研究科，専攻の名称	東北大学大学院工学研究科（博士課程）電気・通信工学専攻
学位論文題目	三相かご形誘導電動機における機内高調波の解析に関する研究
指導教員	東北大学教授 一ノ倉 理
論文審査委員	主査 東北大学教授 一ノ倉 理 東北大学教授 濱島 高太郎 東北大学教授 松木 英敏

## 論文内容要旨

かご形誘導電動機は、直流機のようなブラシや整流子がなく、また同期機のような界磁巻線や永久磁石を必要としないため、構造が単純で堅牢かつ保守性に優れ低価格という利点がある。このため、動力源として工場、鉄道、家電など幅広く用いられている。

誘導電動機における電気・機械エネルギー変換は、固定子と回転子の間に存在するギャップを介してエネルギーをやり取りすることによって行われるために、ギャップの磁束密度が電動機特性に対して重要な影響を与える。したがって、電動機内部に発生する高調波磁束が電動機特性に与える影響について注意を払わなくてはならない。これは、誘導電動機がその動作原理上、他の回転機に比べて固定子と回転子の間に存在するギャップを短く設定する必要があり、電動機特性が高調波磁束の影響を受けやすいためである。回転機全般の高出力密度化は年々進んでおり、誘導電動機においてもさらなる小型軽量化が求められているが、出力密度の増加に伴い、ギャップパーミアンスの脈動や、鉄心の非線形磁気特性による空間高調波磁束が増加する。さらに、近年、インバータ等による可変速運転が多くの分野で利用されているが、この場合、電源波形に含まれる時間高調波成分が機内へ流入する。したがって、高調波磁束に起因する機内温度の上昇、トルクの脈動、振動・騒音の発生等、種々の問題が顕在化している状況にあり、鉄心の磁気飽和状態や高調波磁束が電動機特性に与える影響について、より高精度な評価が求められている。

ここで、機内磁界を有限要素法で数値的に解析すれば、鉄心の非線形磁気特性やギャップパーミアンスの空間分布を比較的容易に考慮することができる。しかし、スロットによるパーミアンスの空間分布に基づく高調波磁束（以下、スロット高調波磁束と呼称）、および高調波起磁力などの高次高調波成分については十分な配慮がなされていない。すなわち、誘導電動機の二次電流には、電源周波数に対して

極めて長い波長となる滑り周波数から、短波長のスロット高調波まで広い周波数成分が含まれるが、これまでの報告では、これらを全て網羅した解析にはなっていない。誘導電動機の高調波問題を対象とした磁界解析では、回転子の滑り現象で回転子側物理量の時間周期が長くなることに起因して、高調波磁界まで計算するには長時間の計算時間を必要とする。また、回転子電流が高次の高調波成分を含んだ誘導電流であり、機内の高調波磁束分布が複雑で、さらに分析データ数も膨大になる。したがって、誘導電動機に対する高調波評価手法の構築および評価精度の向上には、誘導電動機に特有な磁界分布の特徴を適確に把握し、計算時間やデータ量を削減できるモデル化手法が不可欠である。

本論文では、三相誘導電動機の高調波現象の解明を目的として、二次電流を未知数とし、回転子の移動を考慮した二次元有限要素法に基づく磁界解析により、磁束分布に含まれる時間ならびに空間高調波成分を定量的に解析する一手法を提案するとともに、同手法の妥当性について種々検討を行った。その内容を要約すれば以下になる。

第1章では、誘導電動機が開発されてきた歴史的背景を述べ、誘導電動機の高性能化の阻害要因になってきた機内高調波成分に関して、これまでなされてきた検討状況と未解決の課題についてまとめた。また、これらの課題に対し、本研究が採るアプローチの概要を述べた。

第2章では、従来手法の1つであるパーミアンス法に基づき、誘導電動機のギャップ磁束密度を定式化してその高調波成分の発生要因を考察し、あわせてパーミアンス法による定式化表現における評価限界を明らかにした。また、回転機の定量的な動作解析には有限要素法のような数値解析を用いることが有用であるが、誘導電動機の高調波評価と計算精度向上には、誘導電動機に特有な高調波磁界分布の特徴を適確に把握し、計算時間やデータ量を削減できるモデル化手法、および解析結果の解釈手段に対する検討が不可欠なことを述べた。

第3章では、誘導電動機における機内高調波磁界の定量評価を目的とし、回転子の移動と高調波二次電流を考慮した二次元有限要素法による非定常磁界解析を用いた高調波磁界解析手法を提案し、55kW かが形誘導電動機へ適用して磁束量、二次電流、トルクの計算値が実測値と良好に一致することを明らかにした。提案手法は、回転子1スロットピッチに対して等分割となる節点を配置した移動境界、および機内磁界の周期性を利用することにより、滑り周波数1周期以下の磁界解析周期で長周期の二次側諸量の算出が可能であるため、計算時間を大幅に短縮できることが特長である。また、磁界解析で得られた時間ならびに空間高調波の混在する機内磁界を、高調波系列毎に分析して評価する方法を与えた。さらに、分析データと従来の理論解析を比較することにより、高調波発生要因が容易に特定されることを

明らかにした。これらの手法は、磁気飽和のような非線形磁気特性や、歪み波電源による時間高調波を考慮した汎用性の高い高調波分析手法として有用である。

第4章では、かご形誘導電動機におけるスキューの効果を考慮した磁界および渦電流分布を近似的に解析する二次元磁界解析手法を提案した。本章で検討した手法は、固定子と回転子の位置関係の異なる複数の二次元断面の要素分割モデルを用い、各々の要素分割モデルに対して3章で検討した非定常磁界解析を適用して得られる複数の二次電流の解を積分平均して補正し、さらに補正後の二次電流を用いた二次元静磁界解析を行うことによって、スキューの効果を考慮するものである。同手法を3.7kW かご形誘導電動機の二次電流波形、磁束密度波形および磁束密度分布の計算に適用し、それらの高調波成分に対してスキューの有無による高調波成分の違いを明らかにした。また、計算結果と実測結果の比較により、提案手法はスキューと密接に関係する高調波成分に起因した特性の定量的な算定手法として有用であることを示した。

第5章では、磁性楔を適用した誘導電動機における機内高調波成分の定量的把握を目的とし、3章で提案した手法によって、適用楔の種類とギャップ磁束密度分布、および二次電流の高調波成分の関係を求めた。その結果、磁性楔の厚みとギャップ側への張出し量を増すことで、ギャップ磁束密度分布と二次電流中のスロット高調波成分を効果的に低減することが可能であることを明らかにした。また、解析結果と実測結果を比較することで、提案手法は磁性楔適用誘導電動機の高調波磁界を定量的に評価するための一手法として有効であることを示した。

第6章では、インバータ駆動時の誘導電動機における機内高調波磁界の定量的把握を目的とし、3章で提案した手法を用い、通電波形によって変化するギャップ磁束密度分布、二次電流の高調波成分および径方向電磁力成分を定量的に算出した。さらに、歪み波駆動時の二次電流には、一次電流の高調波成分による磁束を打ち消すような二次電流の高調波成分が発生することを定量的に明らかにした。また、3章で提案した高調波解析法を用いれば、入力電源波形が歪み波の場合においても機内に発生する高調波成分を定量的に算出し、従来の理論解析に基づく高調波成分と照合可能な形式で磁界解析結果を分析できることを示した。

第7章では本研究で得られた結果を整理し、本研究の成果および今後の課題と展望について述べた。

以上により、本論文で提案した手法は、誘導電動機における高調波現象を定量的に解析する一手法として有効であることを明らかにした。本手法は、高効率化と小形軽量化を探究していく誘導電動機の設計・開発者に対し、有力な評価手段を提供するものと期待される。

# 論文審査結果の要旨

近年、かご形誘導電動機において、小型軽量化のために動作磁束密度を高く設定する傾向にあり、ギャップパーミアンスの脈動や、鉄心の非線形磁気特性による高調波磁束の増加を引き起こしている。さらに、インバータによる可変速運転では、インバータの非正弦波電圧が誘導電動機内の高調波磁束を増加させる原因になっている。これらの高調波磁束は機内温度の上昇、トルクの脈動、振動および騒音の発生要因になるため、高調波磁束の発生機構を的確に把握して設計に反映させることは重要な課題である。本論文は、三相かご形誘導電動機の高調波現象の解明を目的として、有限要素法による磁界解析に基づき、時間的ならびに空間的高調波磁束の定量的な解析手法を提案するとともに、有効な高調波低減策について考察したもので、全編7章からなる。

第1章は緒言であり、本論文の背景および目的を述べている。

第2章では、従来からの解析手法の1つであるパーミアンス法に基づき、誘導電動機のギャップ磁束密度を定式化してその高調波成分の発生要因を考察するとともに、パーミアンス法による評価限界を指摘している。

第3章では、回転子の移動を考慮した二次元有限要素法による非定常磁界解析を用い、誘導電動機の高調波磁束を解析する手法を提案している。また、解析で得られた時間的ならびに空間的高調波の混在する機内磁束を、高調波系列毎に分析して評価する方法を与えている。提案した解析手法は、接点を適切に配置した移動境界と、機内磁界の周期性を利用することにより、長周期の回転子電流や磁束を短時間で算出できるという点が特長であり、実用的で優れた手法といえる。

第4章では、斜めスロット構造の回転子、いわゆるスキューを有するかご形誘導電動機の機内磁束密度分布と渦電流分布を、3章で提案した手法を応用して近似的に求める方法を考案している。これはスキューによる高調波低減効果を定量的に解明する手段として高く評価される。

第5章では、固定子スロットに磁性楔を適用した誘導電動機における高調波磁束の定量的把握を目的として、3章で提案した手法に基づき、適用楔の種類とギャップ磁束密度分布、および二次電流の高調波成分の関係を明らかにしている。さらに、磁性楔の寸法を適切に設計すれば、ギャップ磁束密度分布と二次電流中のスロット高調波成分を効果的に低減することが可能であることを見出している。これは最適設計を行う上で有用な知見である。

第6章では、インバータ駆動時の誘導電動機における機内高調波磁束の解析を目的として、通電波形によって変化するギャップ磁束密度分布、二次電流の高調波成分、および径方向電磁力成分を算出している。その結果から、歪み波駆動時には、一次電流の高調波成分による磁束を打ち消すような高調波電流が回転子導体を流れることを定量的に明らかにするとともに、3章で提案した解析手法が歪み波駆動時の解析にも有用であることを述べている。

第7章は結言であり、各章の成果をまとめている。

以上要するに本論文は、誘導電動機の高調波現象を定量的に解析する手法を提案し、高調波磁束の発生機構を明らかにするとともに、誘導電動機の小形軽量化と高効率化に対する設計指針を与えたもので、電気機器工学およびパワーエレクトロニクスの発展に寄与するところが少なくない。

よって、本論文は博士(工学)の学位論文として合格と認める。